

## یک رویکرد چندهدفه جدید برای برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت با بهره‌گیری از الگوریتم جستجوی ملودی و روش رضایت‌مندی فازی

محمد کیانی‌مقدم<sup>۱</sup>، احمد سالم‌نیا<sup>۱</sup>، مجتبی شیوایی<sup>۱</sup>، محمدتقی عاملی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران.  
m.kiani.moghaddam@gmail.com, a\_salemnia@sbu.ac.ir, m\_shivaie@sbu.ac.ir, m\_ameli@sbu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، با یک دیدگاه جدید، یک رویکرد چندهدفه خلاقانه برای برنامه‌ریزی نصب فیلترهای اکتیو قدرت در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی ارائه می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، تابع تلفات موتورهای الکتریکی، تلفات هارمونیکی خط انتقال و مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت به‌عنوان شاخص‌های در نظر گرفته‌شده در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشند، درحالی‌که اعوجاج هارمونیکی کل و تکی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز فیلترهای اکتیو قدرت به‌عنوان قیود مسئله در نظر گرفته شده‌اند. رویکرد پیشنهادی یک مسئله بهینه‌سازی غیر محدب است که دارای ماهیت غیرخطی و آمیخته با اعداد صحیح می‌باشد. از این رو، جهت دستیابی به مجموعه جواب بهینه پارتو از الگوریتم جستجوی ملودی، و به‌منظور انتخاب جواب بهینه نهایی از روش رضایت‌مندی فازی استفاده می‌گردد. امکان‌سنجی و اثربخشی رویکرد چندهدفه پیشنهادی در برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت توسط چندین سناریو و مورد مطالعه‌ای مختلف بر روی شبکه آزمون ۱۸-باس IEEE نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده بیانگر قابلیت و سودمندی رویکرد جدید پیشنهادی در برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت در مقایسه با روش‌های دیگر است.

**واژه‌های کلیدی:** اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، الگوریتم جستجوی ملودی، تابع تلفات موتورهای الکتریکی، تلفات هارمونیکی خط انتقال، روش رضایت‌مندی فازی، فیلترهای اکتیو قدرت، مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد سالم‌نیا

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- فلکه چهارم تهرانپارس- بلوار وفادار شرقی- بلوار بهار- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی.

## ۱- مقدمه

## ۱-۱- سابقه و انگیزه

از سوی دیگر، بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs یک مسئله بهینه‌سازی بسیار پیچیده است که در دهه‌های اخیر، تعداد زیادی از تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs از قبیل الگوریتم ژنتیک<sup>۱۱</sup> [۸]، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته<sup>۱۲</sup> [۷، ۱۰، ۱۳]، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته اصلاح‌شده<sup>۱۳</sup> [۹]، الگوریتم کرم شب‌تاب گسسته بهبودیافته<sup>۱۴</sup> [۱۲] و سایر موارد مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه ویژگی‌های برخی از انتشارات گزارش شده در زمینه برنامه‌ریزی APFs در EPDNs و رویکرد پیشنهادی در این مطالعه به‌طور خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های برخی از انتشارات فنی گزارش شده در مراجع و رویکرد پیشنهادی در این مطالعه در زمینه برنامه‌ریزی APFs

رویکرد پیشنهادی	[۱۲]	[۱۰]	[۸]	[۷]	مراجع ویژگی
4 APFs	1 APFs	1 APFs	1 APFs	3 APFs	ساختار APFs
چندهدفه	چندهدفه	تک هدفه	تک هدفه	تک هدفه	تک هدفه یا چندهدفه
THDV MLLF HTLL $I_{af}$	THDV $V_{dev}$ $I_{af}$	THDV $I_{af}$	THDV $I_{af}$	THDV MLLF HTLL $I_{af}$	اهداف
بله	بله	خیر	بله	بله	حداکثر اندازه مجاز APF
MSA	IDFA	MPSO	GA	DPSO	رویکرد حل
FSM	خیر	خیر	خیر	خیر	تصمیم‌گیری چند معیاره

این مطالعات نشان می‌دهد که برخی نقاط ضعف در جبهه مدل‌سازی— از قبیل استفاده از رویکردهای تک هدفه، در نظر نگرفتن قیود فنی و اقتصادی و در جبهه تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی— از قبیل دقت ناکافی، همگرایی زودرس، عدم انعطاف‌پذیری و عدم بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۱۴</sup> وجود دارد.

## ۱-۳- نوآوری‌ها و سهم مشارکت

این مقاله بر یک رویکرد چندهدفه جدید به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs متمرکز شده است. در رویکرد پیشنهادی، THDV، MLLF، HTLL و  $I_{af}$  به‌عنوان شاخص‌های مسئله و اعوجاج‌های هارمونیک فردی و کلی ولتاژ و همچنین حداکثر اندازه مجاز APFs به‌عنوان محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، چهار نوع از APFs با مقدار جریان نامی که می‌توانند انعطاف‌پذیری در کنترل هارمونیک‌ها را افزایش دهند در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن مجموعه جواب بهینه پارتو<sup>۱۵</sup>، الگوریتم جستجوی مولدی<sup>۱۶</sup> و برای انتخاب جواب نهایی، روش رضایت‌مندی فازی<sup>۱۷</sup> به کار گرفته شده است. نوآوری‌ها و سهم مشارکت مطالعه فوق در زمینه برنامه‌ریزی APFs در EPDNs به شرح زیر بیان می‌گردد:

در سال‌های اخیر، گسترش روزافزون تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت و بارهای غیرخطی (منابع مولد هارمونیک) منجر به افزایش سطح اعوجاج‌های هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه‌های توزیع توان الکتریکی<sup>۱</sup> گردیده است [۱]. جریان‌های هارمونیک ناشی از این بارهای غیرخطی می‌توانند منجر به اعوجاج شدید شکل موج ولتاژ در نقطه اتصال مشترک<sup>۲</sup>، نوسانات گشتاور، افزایش تلفات، کاهش عمر مفید ادوات و سایر موارد گردند [۱]. به‌طور سنتی، فیلترهای قدرت پسیو<sup>۳</sup> R-L-C به‌منظور کاهش هارمونیک‌ها در EPDNs بکار گرفته می‌شوند [۲]. به‌طور کلی، PPFs دارای معایبی از قبیل، اندازه بزرگ، رزونانس‌های سری و موازی، جبران‌سازی ثابت و کاربرد تنها برای هارمونیک خاص می‌باشند [۳]. بنابراین، به‌منظور غلبه بر مشکلات PPFs فیلترهای قدرت اکتیو<sup>۴</sup> توسعه داده شده‌اند [۴]. به‌طور کلی، APFs جریان‌هایی با اندازه برابر ولی مخالف به داخل PCC از EPDNs تزریق می‌کنند، که با مؤلفه‌های هارمونیک کل به‌منظور از بین بردن مؤلفه‌های غیر سینوسی بارهای غیرخطی جمع می‌شوند [۶-۴]. هدف از به‌کارگیری APFs در EPDNs، جبران‌سازی هارمونیک‌ها، توان راکتیو، فلیکر، توالی منفی و سایر موارد است. با توجه به قابلیت‌ها و توانایی‌های APFs، به‌ویژه در حذف هارمونیک‌ها مطالعات زیادی در دهه‌های اخیر بر روی APFs متمرکز شده است [۱۲-۴].

## ۱-۲- پیشینه تحقیق

مدل‌های ریاضی بسیاری برای حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در منابع سیستم‌های قدرت وجود دارند. مدل‌های ارائه شده می‌توانند به‌عنوان دو نوع از توابع هدف و دو نوع از محدودیت‌ها طبقه‌بندی شوند [۱۲-۷]. نوع اول توابع هدف سعی در مینیمم کردن اعوجاج‌های ولتاژ به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب اعوجاج‌های هارمونیک در EPDNs می‌باشند. نوع دیگر از توابع هدف استفاده از استانداردهای هارمونیک بر روی اعوجاج هارمونیک ولتاژ و سطوح THD به‌منظور مینیمم کردن ظرفیت APFs می‌باشند. مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی اساساً یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده است که توابع هدف مختلفی از قبیل، اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ<sup>۵</sup>، اعوجاج هارمونیک کل جریان<sup>۶</sup>، تلفات هارمونیک خط انتقال<sup>۷</sup>، مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت<sup>۸</sup>، تابع تلفات موتورهای الکتریکی<sup>۹</sup> و سایر موارد در آن می‌توانند مورد مطالعه قرار گیرند [۱۲-۷]. قیود نیز به دو دسته تقسیم می‌گردند. دسته اول، محدودیت‌های مرتبط با استانداردهای هارمونیک اعمال شده بر سطوح هارمونیک‌های ولتاژ مطابق با استاندارد IEEE-۵۱۹-۲ و دسته دوم، محدودیت‌های مرتبط با حداکثر جریان APFs می‌باشند [۱۲-۷].

مجموعه‌ای از مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته شده. شاخصی برای شماره باس. مجموعه‌ای از باس‌های کاندید در نظر گرفته شده. ماتریس ولتاژ شبکه برای هارمونیک مرتبه  $h$  ماتریس ادمیتانس شبکه برای هارمونیک مرتبه  $h$  ماتریس جریان بارهای غیرخطی برای هارمونیک مرتبه  $h$  ماتریس جریان APFs برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش حقیقی ولتاژ در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش موهومی ولتاژ در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش حقیقی جریان بار غیرخطی در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش موهومی جریان بار غیرخطی در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش حقیقی جریان APF در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش موهومی جریان APF در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$

(۱) یک رویکرد چندهدفه جدید مبتنی بر MLLF، THDV، HTLL و I<sub>af</sub> به منظور مقابله با مشکلات هارمونیک‌ها و افزایش کیفیت توان تحویلی به مشترکین در EPDNs ارائه شده است.  
 (۲) انعطاف‌پذیری رویکرد پیشنهادی توسط استفاده از چهار نوع مختلف از APFs با توان نامی متفاوت در روند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs بهبود یافته است.  
 (۳) یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته قدرتمند به همراه رویکرد رضایت‌مندی فازی برای غلبه بر مشکلات ماهیت غیر محذب، غیرخطی و مختلط صحیح از مسئله برنامه‌ریزی APFs و تعیین جواب بهینه نهایی استفاده شده است.  
 ادامه این مقاله در هفت بخش سازماندهی شده است. بخش ۲ مدل‌سازی EPDNs و APFs را توصیف می‌کند. توابع هدف و قیود مسئله برنامه‌ریزی APFs در بخش ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، الگوریتم حل پیشنهادی در بخش ۴ گزارش شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ ارائه شده است. مقایسه رویکرد پیشنهادی با روش‌های بکار گرفته شده در برخی مراجع در بخش ۶ نشان داده شده است. در نهایت، بخش ۷ به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

## ۲-۲- مدل‌سازی فیلترهای اکتیو قدرت

در این مقاله، مدل پیشنهادی برای APFs، یک منبع جریان است که جریان هارمونیکی به داخل PCC از EPDNs تزریق می‌کند [۱۲-۷]. مدل فazor از APFs با استفاده از رابطه (۵) ارائه شده است.

$$I_{af,(b)}^{(h)} = I_{af,(b),r}^{(h)} + jI_{af,(b),i}^{(h)}; \quad \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (5)$$

در رابطه (۵) داریم:

جریان APF در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش حقیقی جریان APF در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$  بخش موهومی جریان APF در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$

میزان جریان RMS از APF می‌تواند توسط رابطه (۶) تعریف شود.

$$I_{af,(b)} = \sqrt{\sum_{h=1}^H \left( I_{af,(b),r}^{(h)} \right)^2 + \left( I_{af,(b),i}^{(h)} \right)^2}; \quad \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (6)$$

## ۳- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو

### قدرت در شبکه‌های توزیع الکتریکی

رویکرد چندهدفه پیشنهادی در این مقاله، به طور همزمان چهار هدف THLL، MLLF، THDV و I<sub>af</sub> را کمینه خواهد کرد.

## ۲- مدل‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی و فیلترهای اکتیو قدرت در رویکرد پیشنهادی

### ۲-۱- مدل‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

به منظور مدل کردن کل سیستم، یک شبکه EPDNs با  $B$  باس را در نظر بگیرید که، هر باس می‌تواند شامل یک یا چند بار غیرخطی و همچنین می‌تواند یک باس کاندید برای نصب یک یا چند APFs باشد. همچنین، بارهای غیرخطی به‌عنوان منابع تولیدکننده هارمونیک و EPDNs به‌عنوان عناصر ادمیتانس مدل می‌شوند. ولتاژ در EPDNs با  $B$  باس برای هارمونیک مرتبه  $h$  در حضور بارهای غیرخطی و فیلترهای اکتیو می‌تواند با استفاده از روابط (۴)-(۱) محاسبه شود.

$$V^{(h)} = \left[ Y^{(h)} \right]^{-1} \cdot \left[ I_{nl}^{(h)} - I_{af}^{(h)} \right]; \quad \forall h = 1, \dots, H \quad (1)$$

$$V^{(h)} = \left[ V_{(1),r}^{(h)} + jV_{(1),i}^{(h)}, \dots, V_{(B),r}^{(h)} + jV_{(B),i}^{(h)} \right]^T; \quad \forall h = 1, 2, \dots, H; \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (2)$$

$$I_{nl}^{(h)} = \left[ I_{nl,(1),r}^{(h)} + jI_{nl,(1),i}^{(h)}, \dots, I_{nl,(B),r}^{(h)} + jI_{nl,(B),i}^{(h)} \right]^T; \quad \forall h = 1, 2, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (3)$$

$$I_{af}^{(h)} = \left[ I_{af,(1),r}^{(h)} + jI_{af,(1),i}^{(h)}, \dots, I_{af,(B),r}^{(h)} + jI_{af,(B),i}^{(h)} \right]^T; \quad \forall h = 1, 2, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (4)$$

در روابط (۱) الی (۴) داریم:

$h$  شاخصی برای مرتبه هارمونیک.

### ۳-۱- اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ

در این مطالعه، تابع وابسته THDV یک فرمول رایج استفاده شده در بسیاری از مراجع در این زمینه است [۷-۱۲]. بنابراین، شاخص THDV با استفاده از رابطه (۷) تعریف شده است.

$$OF_{THDV} = \sum_{b=1}^B THDV_{(b)}; \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (7)$$

در جایی که:

$$THDV_{(b)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |V_{(b)}^{(h)}|^2}}{|V_{(b)}^{(1)}|}; \quad (8)$$

$$\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$$

در روابط (۷) و (۸) داریم:

THDV اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ.

$THDV_{(b)}$  اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ در باس  $b$

$|V_{(b)}^{(h)}|$  دامنه ولتاژ در باس  $b$  برای هارمونیک مرتبه  $h$

$|V_{(b)}^{(1)}|$  دامنه ولتاژ در باس  $b$  برای فرکانس اصلی.

### ۳-۲- تابع تلفات موتورهای الکتریکی

هارمونیک‌های ولتاژ اثرات نامطلوبی بر موتورهای القایی از قبیل افزایش تلفات، افزایش درجه حرارت کاری، کاهش عمر و سایر موارد دارند [۷]. از نتایج پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، رابطه بین تلفات موتور و هارمونیک‌های ولتاژ می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

(۱) تلفات تقریباً با عکس مرتبه هارمونیک متناسب است.

(۲) تلفات تقریباً با مربع دامنه هارمونیک متناسب است.

از این رو، در این مطالعه به منظور بررسی تأثیرات فوق، شاخص MLLF با استفاده از رابطه (۹) توصیف شده است.

$$OF_{MLLF} = \sum_{b=1}^B MLLF_{(b)}; \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (9)$$

در جایی که:

$$MLLF_{(b)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H (|V_{(b)}^{(h)}|^2 / h)}}{|V_{(b)}^{(1)}|}; \quad (10)$$

$$\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$$

در روابط (۹) و (۱۰) داریم:

MLLF تابع تلفات موتورهای الکتریکی.

$MLLF_{(b)}$  تابع تلفات موتورهای الکتریکی در باس  $b$

### ۳-۳- تلفات هارمونیک خطوط انتقال

هارمونیک‌ها همچنین دارای تأثیرات زیان‌آوری از قبیل اشغال ظرفیت انتقال، افزایش تلفات و سایر موارد بر روی سیستم‌های قدرت می‌باشند [۷]. از این رو، در این بخش، به منظور بررسی این تأثیرات شاخص HTLL بر اساس رابطه (۱۱) تعریف شده است.

$$OF_{HTLL} = \sum_{h=2}^H HTLL_{(h)}; \forall h = 1, 2, \dots, H \quad (11)$$

در جایی که:

$$HTLL_{(h)} = \sum_{b=1}^H \left( \sum_{\substack{b'=1 \\ b'>b}}^B \frac{R_{(b),(b')}^{(h)}}{(Z_{(b),(b')}^{(h)})^2} |V_{(b)}^{(h)} - V_{(b')}^{(h)}|^2 \right); \quad (12)$$

$$\forall b, b' = 1, 2, \dots, B, \forall h = 2, 3, \dots, H$$

در روابط (۱۱) و (۱۲) داریم:

HTLL تلفات هارمونیک خطوط انتقال.

$HTLL_{(h)}$  تلفات هارمونیک خطوط انتقال برای هارمونیک  $h$

$b'$  شاخصی از شماره باس.

$R_{(b),(b')}^{(h)}$  مقاومت اهمی بین باس  $b$  و  $b'$  برای هارمونیک مرتبه  $h$

$Z_{(b),(b')}^{(h)}$  امپدانس بین باس  $b$  و  $b'$  برای هارمونیک مرتبه  $h$

### ۳-۴- مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت

در این مطالعه، یکی از اهداف اصلی پاسخگویی به سطوح استاندارد هارمونیک است، در حالی که، مجموع جریان‌های تزریقی توسط APFs کمینه گردد. بنابراین، شاخص  $I_{af}$  با استفاده از رابطه (۱۳) تعریف شده است [۷-۱۲]. شایان ذکر است که، هزینه‌های یک APF متناسب با جریان‌های تزریقی توسط آن است. از این رو، شاخص فوق هزینه‌های APFs نصب شده در EPDNs را کمینه خواهد کرد.

$$OF_{I_{af}} = \sum_{b=1}^B (I_{af})_{(b)}; \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (13)$$

در جایی که:

$$(I_{af})_{(b)} = \sum_{b=1}^B \sqrt{\sum_{h=2}^H |(I_{af})_{(b)}^{(h)}|^2}; \quad (14)$$

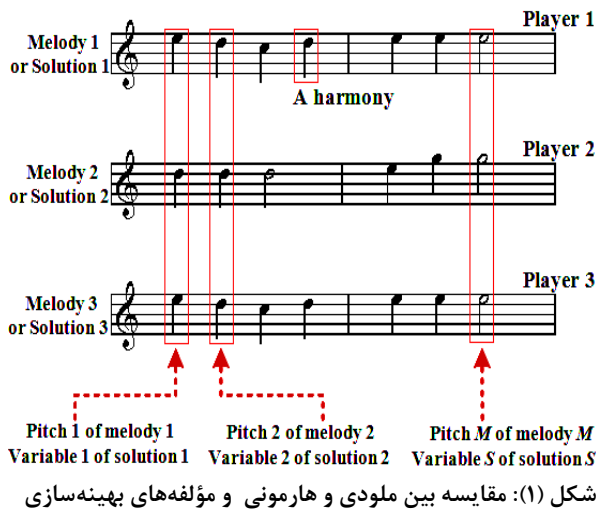
$$\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$$

در روابط (۱۳) و (۱۴) داریم:

$I_{af}$  مجموع جریان‌های APFs.

$(I_{af})_{(b)}$  مجموع جریان‌های APFs در باس  $b$

(به‌عنوان مثال، چندین حافظه که حافظه نوازنده<sup>۱۹</sup> نامیده می‌شود) را به‌طور همزمان برای پیدا کردن بهترین جانشینی گام‌ها در یک ملودی بکار می‌گیرد. در موسیقی، هارمونی استفاده از صداهای یا زه‌های همزمان است و اغلب به جنبه‌های عمودی از فضای موسیقی اشاره دارد. در حالی که، خط ملودی اشاره به جنبه‌های افقی دارد. الگوریتم جستجوی ملودی به‌عنوان یک تکنیک بهینه‌سازی بهبودیافته جدید به‌منظور افزایش بهره‌وری الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهاد شده است. این الگوریتم فرآیندهای اجرای موسیقی و روابط تعاملی رخ داده بین اعضای گروه نوازندگان را تقلید می‌کند، در حالی که، آن‌ها در جستجوی بهترین مجموعه صدادهی درون یک خط ملودی می‌باشند. در چنین گروهی، وجود چندین نوازنده موسیقی باسلیقه‌ها، ایده‌ها، سبک‌ها و تجربیات مختلف می‌تواند منجر به دستیابی و رسیدن به بهترین توالی از سریع‌ترین صدادهی شود. شکل (۱)، نشان‌دهنده تفاوت بین ساختار هارمونی و ملودی و قیاس بین ملودی‌هایی که توسط نوازندگان موسیقی اجرا می‌شود و اجزاء و مؤلفه‌های مسئله بهینه‌سازی است. الگوریتم جدید مفاهیم اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی را بکار گرفته اما در ساختار کاملاً متفاوت است.



برخلاف الگوریتم HSA که از یک حافظه هارمونی استفاده می‌کند، الگوریتم MSA چندین حافظه به نام حافظه نوازنده به کار می‌گیرد. حافظه‌ها با یکدیگر مانند عملکرد نوازندگان در یک گروه موسیقی ارتباط برقرار می‌کنند. علاوه بر این، در الگوریتم MSA محدوده امکان‌پذیر هر صدادهی برای انتخاب تصادفی می‌تواند از طریق تکرارهای مختلف تغییر کند. شکل (۲) ساختار حافظه ملودی<sup>۲۰</sup> در الگوریتم MSA را نشان می‌دهد. در MSA بردار حل "ملودی" نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هر ملودی یک برداری است که اجزای آن مقادیر اختصاص داده شده به متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی می‌باشند. در صورتی که مسئله بهینه‌سازی دارای  $N$  متغیر باشد، در نتیجه بردار ملودی نیز دارای  $N$  جزء خواهد بود. ارتباط متناظر بین مفاهیم موسیقی و پارامترهای الگوریتم MSA در جدول (۲) مشخص شده است.

### ۳-۵- قیود مسئله برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت

رویکرد پیشنهادی مقید به قیودی از قبیل اعوجاج‌های هارمونیکی کل و فردی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز APFs به شرح زیر است.

$$I_{af,(b)}^{(a)} \leq \overline{I_{af,(b)}}; \forall b = 1, 2, \dots, B, \forall a = 1, 2, \dots, A \quad (15)$$

$$I_{af,(b)}^{(a)} \in D; \forall b = 1, 2, \dots, B, \forall a = 1, 2, \dots, A \quad (16)$$

$$\left| V_{(b)}^{(h)} \right| \leq \overline{V_{(b)}^{(h)}}; \forall b = 1, 2, \dots, B, \forall h = 2, 3, \dots, H \quad (17)$$

$$THDV_{(b)} \leq \overline{THDV_{(b)}}; \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (18)$$

در روابط (۱۵)-(۱۸) داریم:

$a$	شاخصی از APFs
$A$	مجموعه‌ای از APFs
$I_{af,(b)}^{(a)}$	جریان APF $a$ در باس $b$
$\overline{I_{af,(b)}}$	حداکثر جریان APF در باس $b$
$D$	مجموعه‌ای از انواع مختلف APFs در نظر گرفته شده.
$\overline{V_{(b)}^{(h)}}$	حداکثر مقدار مجاز ولتاژ در باس $b$ برای هارمونیک مرتبه $h$
$\overline{THDV_{(b)}}$	حداکثر مقدار مجاز اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ در باس $b$

معادله (۱۵) حداکثر اندازه مجاز APF  $a$  در باس  $b$  از شبکه توزیع انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد. اندازه APFs می‌تواند به‌صورت پیوسته یا گسسته باشد. با توجه به اینکه منبع DC در ساختار APFs توسط سلف‌ها و/یا خازن‌ها که ادوات گسسته می‌باشند پیاده‌سازی می‌شود، نادیده گرفتن این محدودیت منجر به نتایج غیرعملی می‌شود. مقدار اندازه‌های APFs با کوچک‌ترین مقدار از مجموعه  $D$ ، با توجه به معادله (۱۶) برابر است،  $D$  یک مجموعه از مقادیر گسسته با مقادیر صفر و مجاز است، هرزمانی که اندازه‌های APFs گسسته باشند، و همچنین  $D$  یک مجموعه از مقادیر حقیقی و غیر منفی است، مشروط بر اینکه اندازه‌های APFs پیوسته در نظر گرفته شود. روابط (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت مرتبط با اعوجاجات هارمونیکی تک‌ و کلی ولتاژ در باس  $b$  از شبکه توزیع انرژی الکتریکی را تشریح می‌کنند.

### ۴- الگوریتم حل

#### ۴-۱- الگوریتم جستجوی ملودی

الگوریتم جستجوی ملودی یک الگوریتم فرا ابتکاری است که از پدیده‌های موسیقی الهام گرفته شده است، و بر اساس مفاهیم اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۱۸</sup> پایه‌گذاری شده است [۱۴]. الگوریتم جستجوی هارمونی از یک تک حافظه هارمونی استفاده می‌کند [۱۵]، در حالی که، الگوریتم جستجوی ملودی یک‌روند بداهه‌نوازی گروهی

## ۴-۱-۲- فاز دوم: بداهه‌نوازی فردی

## • تعیین اولیه حافظه نوازنده‌ها:

در این بخش، حافظه‌های نوازنده‌ها با ملودی‌های اولیه تصادفی پر می‌شوند. فرآیند فوق با استفاده از معادلات (۲۱)-(۱۹) توصیف شده است.

$$MM = [PM_{(1)}, PM_{(2)}, \dots, PM_{(i)}]^T; \quad (19)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, PMN$$

$$PM_{(i)} = \begin{bmatrix} X_{(1)}^{(1)} & \dots & X_{(N-1)}^{(1)} & X_{(N)}^{(1)} \\ X_{(1)}^{(2)} & \dots & X_{(N-1)}^{(2)} & X_{(N)}^{(2)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ X_{(1)}^{(PMS)} & \dots & X_{(N-1)}^{(PMS)} & X_{(N)}^{(PMS)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$X_{(n)}^{(j)} = LB_{(n)} + rand(0,1) * (UB_{(n)} - LB_{(n)}); \quad (21)$$

$$\forall n = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, PMS$$

## • بداهه‌نوازی یک ملودی جدید برای هر نوازنده:

در این بخش، برای هر نوازنده یک ملودی جدید، جایگزین جدید<sup>۲۸</sup> مبتنی بر مفاهیم اصلی بداهه‌نوازی در HSA تولید می‌شود.

## • به‌روزرسانی حافظه هر نوازنده:

در این بخش، اگر بردار ملودی جدید از بدترین بردار ملودی در حافظه نوازنده متناظر بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار ملودی جدید داخل  $PM_{(i)}$  قرار گرفته و بدترین بردار ملودی موجود از مجموعه  $PM_{(i)}$  کنار گذاشته می‌شود. روند این فرآیند توسط رابطه (۲۲) بیان می‌شود.

$$x_{(i),worst} = x_{(i),new}; \text{ if } f(x_{(i),new}) < f(x_{(i),worst}); \quad (22)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, PMN$$

## • بررسی معیار توقف فاز دوم:

اگر معیار توقف فاز دوم (حداکثر تعداد بداهه‌نوازی) برآورده شود، محاسبات فاز دوم پایان یافته و در غیر این صورت بخش‌های دوم و سوم از فاز دوم تکرار می‌گردند.

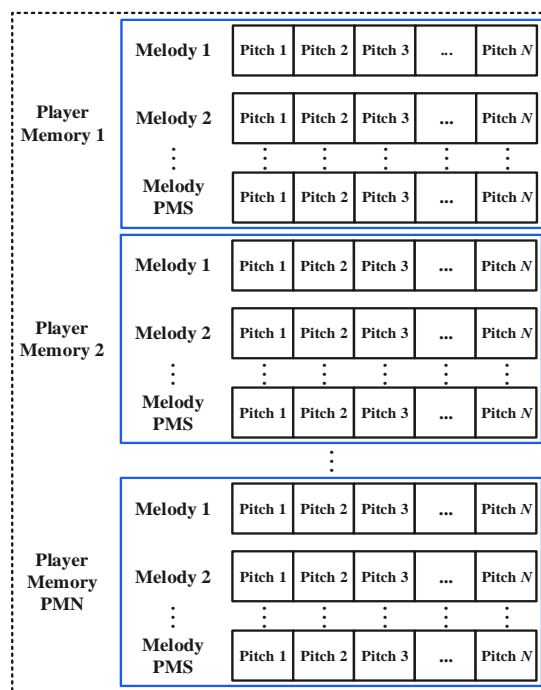
## ۴-۱-۳- فاز سوم: بداهه‌نوازی گروهی

## • بداهه‌نوازی یک ملودی جدید برای هر نوازنده با توجه

به محدوده امکان‌پذیر صداده‌ها:

در این بخش، یک ملودی جدید با استفاده از روش AIP برای هر نوازنده با توجه به محدوده امکان‌پذیر صداده‌ها بداهه‌نوازی می‌شود. شایان ذکر است که، محدوده امکان‌پذیر صداده‌ها می‌تواند از طریق تکرارهای مختلف متفاوت باشد.

## • به‌روزرسانی حافظه هر نوازنده:



شکل (۲): ساختار حافظه ملودی در الگوریتم MSA

جدول (۲): ارتباط متناظر بین مفاهیم موسیقی و پارامترهای الگوریتم

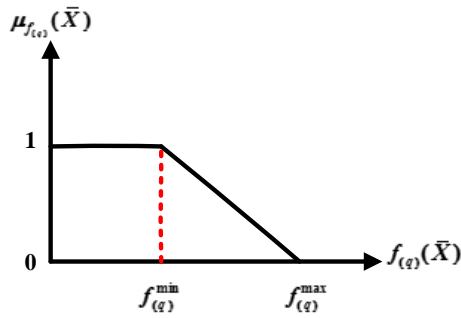
شماره	MSA	مفاهیم موسیقی
۱	متغیر تصمیم‌گیری	ابزار موسیقی (ساز)
۲	محدوده متغیرها	محدوده نت موسیقی (آهنگ)
۳	بردار جواب	ملودی
۴	تابع هدف	معیار زیبایی
۵	تکرار	تمرین
۶	حافظه ملودی	تجربه

بدنه اصلی الگوریتم MSA شامل دو فاز محاسباتی مختلف است. در فاز ابتدایی، هر نوازنده می‌تواند ملودی خود را بدون تأثیر دیگران بداهه‌نوازی کند، درحالی‌که در فاز دوم، الگوریتم به صورت یک عملکرد گروهی عمل می‌کند. ملودی‌های مختلف موجود در گروه نوازندگان می‌تواند نوازندگان را برای انتخاب بهتر صداده‌های تصادفی هدایت کند، و احتمال آهنگ‌سازی و نواختن یک ملودی بهتر در مرحله بعدی افزایش می‌یابد. مراحل اصلی الگوریتم MSA به شرح زیر است.

## ۴-۱-۱- فاز اول: تعیین اولیه مسئله بهینه‌سازی و اتخاذ

## پارامترهای الگوریتم

در این مرحله مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای MSA مشخص می‌شوند، که شامل، تعداد حافظه‌های نوازنده<sup>۲۱</sup>، اندازه حافظه نوازنده<sup>۲۲</sup>، تعداد بداهه‌نوازی فاز دوم<sup>۲۳</sup> (معیار توقف فاز دوم)، تعداد بداهه‌نوازی فاز سوم<sup>۲۴</sup> (معیار توقف فاز سوم)، فاصله پهنای باند<sup>۲۵</sup>، نرخ ملاحظه حافظه نوازنده<sup>۲۶</sup>، و نرخ تنظیم صداده‌ها<sup>۲۷</sup> می‌باشند.



شکل (۳): تابع عضویت متناظر با تابع هدف  $q$

تابع عضویت در نظر گرفته‌شده برای تابع هدف  $q$  با استفاده از رابطه (۲۳) تعریف شده است.

$$\mu_{f(q)}(\bar{X}) = \begin{cases} 0 & ; f_{(q)}(\bar{X}) \geq f_{(q)}^{\max} \\ \frac{f_{(q)}^{\max} - f_{(q)}(\bar{X})}{f_{(q)}^{\max} - f_{(q)}^{\min}} & ; f_{(q)}^{\min} \leq f_{(q)}(\bar{X}) \leq f_{(q)}^{\max} \\ 1 & ; f_{(q)}(\bar{X}) \leq f_{(q)}^{\min} \end{cases} \quad (23)$$

$\forall q = 1, \dots, Q$

در رابطه (۲۳) داریم:

$q$	شاخصی برای شماره تابع هدف.
$Q$	مجموعه‌ای از توابع هدف در نظر گرفته‌شده.
$\mu_{f(q)}(\bar{X})$	تابع عضویت در نظر گرفته‌شده برای تابع هدف $q$
$f_{(q)}^{\max}$	حداکثر مقدار تابع هدف $q$
$f_{(q)}^{\min}$	حداقل مقدار تابع هدف $q$
$f_{(q)}(\bar{X})$	مقدار تابع هدف $q$ در راه حل $\bar{X}$ .

پس از تعریف توابع عضویت، راه‌های مختلفی برای انتخاب راه‌حل نهایی وجود دارد. هر روش یک فلسفه متفاوتی را در نظر می‌گیرند. در این مطالعه، از رویکرد محافظه‌کارانه به منظور انتخاب راه‌حل نهایی در میان راه‌حل‌های بهینه پارتو استفاده شده است. در رویکرد محافظه‌کارانه یک تصمیم‌گیری محافظه‌کارانه می‌تواند با تلاش برای یافتن راه‌حلی که مینیمم آن ماکزیمم تمامی توابع هدف را برآورده سازد به دست آید. با استفاده از فرمول حداقل-حداکثر، راه‌حل نهایی می‌تواند با استفاده از رابطه (۲۴) به دست آید.

$$\max_{(q)} \left\{ \min_{\bar{X}} \left\{ \mu_{f(q)}(\bar{X}) \right\} \right\}; \forall q = 1, 2, \dots, Q \quad (24)$$

### ۳-۴ الگوریتم حل پیشنهادی

در رویکرد پیشنهادی، قسمت‌های حقیقی و موهومی از جریان APF در هر مرتبه هارمونیک به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری (بردار ملودی) در نظر گرفته می‌شوند. در ساختار ارائه‌شده، هر قسمت از بردار ملودی (یک باس) نمایانگر  $\left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_r$  و  $\left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_i$  است. روند نمای مرتبط با الگوریتم حل پیشنهادی در شکل (۴) ترسیم شده است.

در این بخش، مجدداً در صورتی که بردار ملودی جدید بداهه‌نوازی شده برای نوازنده  $i$  از بدترین بردار ملودی در  $PM_{(i)}$  بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار ملودی جدید داخل  $PM_{(i)}$  قرار گرفته و بدترین ملودی از مجموعه  $PM_{(i)}$  کنار گذاشته می‌شود (رابطه (۲۲)).

### • تعیین محدوده‌های امکان‌پذیر صدادهی برای بداهه-

#### نوازی بعدی (فقط برای تصادفی):

یک تفاوت عمده بین الگوریتم‌های MSA و HSA در این بخش وجود دارد. در فاز دوم، بهترین متغیرهای ملودی از هر نوازنده ذخیره می‌شوند، و محدوده‌های امکان‌پذیر جدید برای هر متغیر تصمیم‌گیری می‌تواند برای تصادفی سازی بعدی به شرح زیر محاسبه شوند.

شبه‌کد برای تعیین محدوده‌های امکان‌پذیر صدادهی برای بداهه‌نوازی بعدی

**Input:**  $x_{(n),(i),best}; \forall i = 1, \dots, PMN$

1: **for each**  $n \in [1, 2, \dots, N]$  **do**

2:  $LB_{(n)} = \min(x_{(n),(i),best}; \forall i = 1, \dots, PMN)$

3:  $UB_{(n)} = \max(x_{(n),(i),best}; \forall i = 1, \dots, PMN)$

4: **end for**

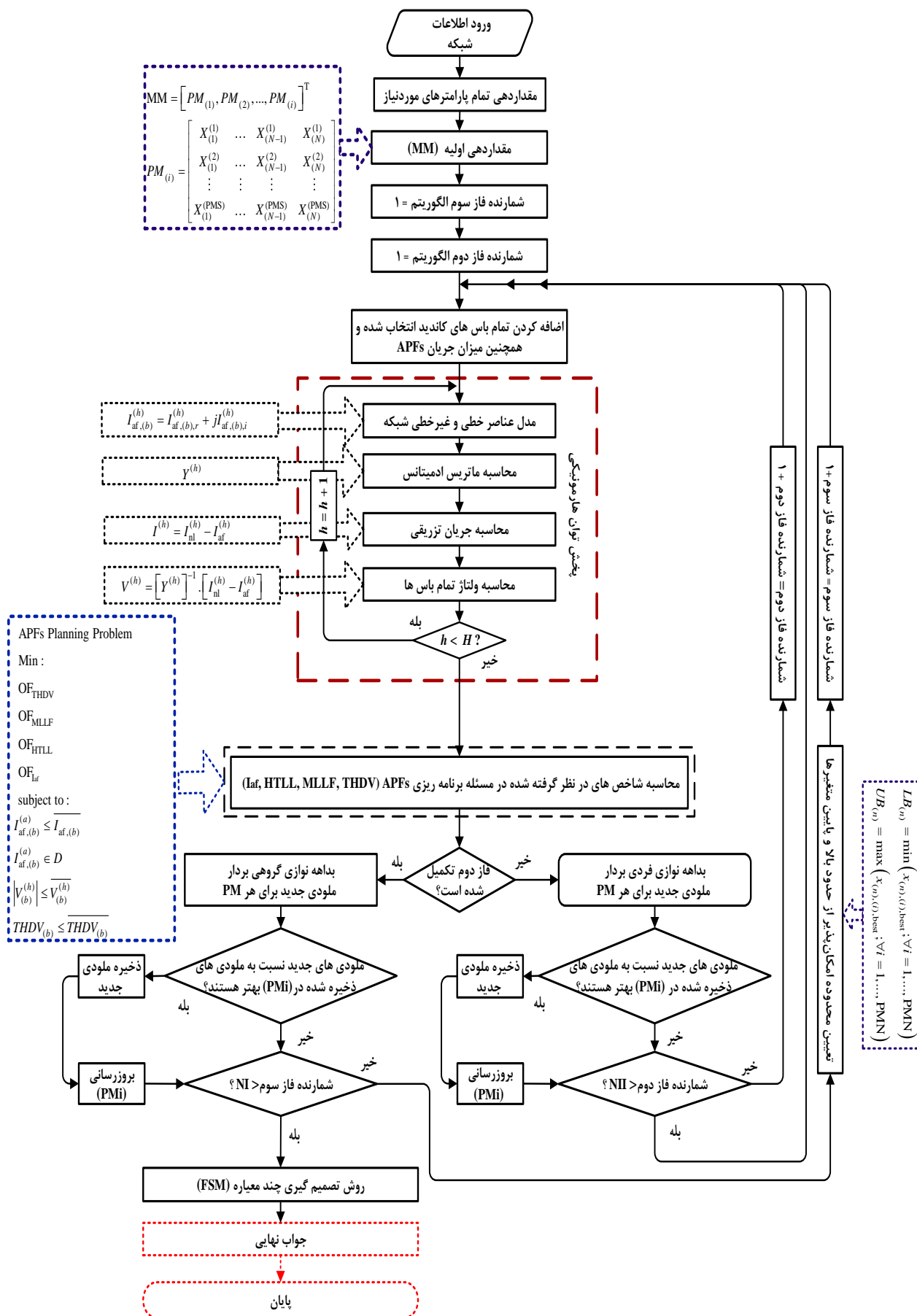
**Output:**  $UB_{(n)}, LB_{(n)}$

### • برآورده شدن معیار توقف فاز سوم:

در این بخش، بخش‌های اول، دوم و سوم تکرار می‌شوند تا معیار توقف الگوریتم برآورده شود.

### ۴-۲- تصمیم‌گیری چندمعیاره

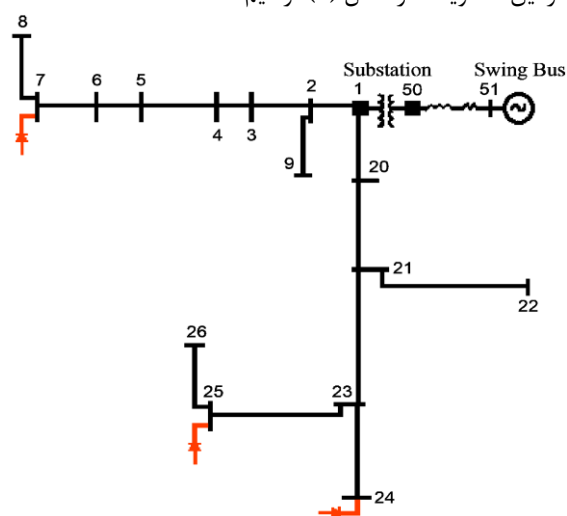
پس از تعیین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو، مناسب است که یک جواب انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه که نشان‌دهنده یک مصالحه بین توابع هدف مختلف است تعیین شود. روش‌های زیادی برای انتخاب یک جواب سازشکارانه بین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو وجود دارد. روش رضایت‌مندی فازی به دلیل سادگی و شباهت به منطق انسان یکی از روش‌های مناسب است [۱۶]. هر یک از مجموعه‌های فازی توسط معادلاتی که تابع عضویت نام دارند، نمایش داده می‌شوند. مقدار بالاتر این تابع بیانگر سطح ارضاء بالاتری است. به بیان دیگر، برای هر راه‌حل در جبهه بهینه پارتو، مانند  $\bar{X}$ ، یک تابع عضویت مانند  $\mu_{f(q)}(\bar{X})$  تعریف می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده سطحی از  $\bar{X}$  می‌باشد که متعلق است به مجموعه‌ای که تابع هدف  $q$  را کمینه می‌کند. مقدار تابع عضویت بین ۰ تا ۱ متفاوت است. ارزش عضویت (۰) نشان‌دهنده ناسازگاری با مجموعه است. در حالی که، ارزش (۱) به معنای سازگاری کامل با مجموعه است. انواع مختلفی از توابع عضویت مانند توابع عضویت خطی، نمایی و سایر موارد پیشنهاد شده‌اند. در این مطالعه، از تابع عضویت خطی استفاده شده است. این تابع دارای یک حد پایین و یک حد بالا است و به صورت یک تابع یکنواخت نزولی نمایش داده می‌شود. شکل (۳) چنین تابع عضویتی را نشان می‌دهد [۱۶].



شکل (۴): روند نمای الگوریتم پیشنهادی به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه

## ۵- شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی مسئله برنامه‌ریزی APFs بر روی شبکه آزمون ۱۸- باس IEEE نشان داده شده در شکل (۵) پیاده‌سازی گردیده است. شبکه فوق در بسیاری از تحقیقات در زمینه برنامه‌ریزی فیلترهای قدرت مورد استفاده قرار گرفته شده است [۷، ۸، ۱۱]. اطلاعات کامل مربوط به شبکه فوق در مرجع [۷] موجود است. این شبکه دارای چندین بار خطی و سه بار غیرخطی به صورت مبدل‌های ۶ پالس ۲/۵MW در باس‌های ۷، ۲۴ و ۲۵ است، که هارمونیک‌های مرتبه ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۳ و ۲۵ در شبکه ایجاد می‌کنند. محتویات هارمونیک‌های بارهای غیرخطی (منابع جریان‌های هارمونیک) بر حسب پروبیت در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین، به منظور توضیح بیشتر این محتویات در شکل (۶) ترسیم شده است.

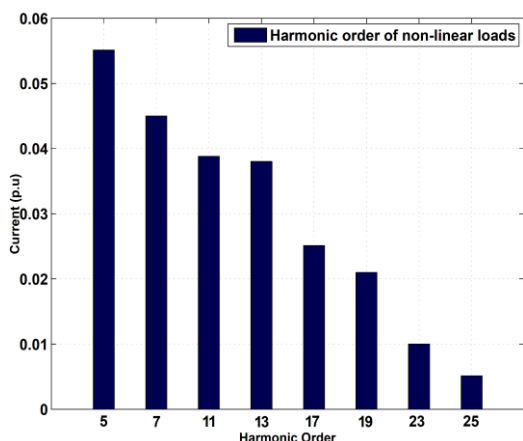


شکل (۵): شبکه آزمون ۱۸- باس IEEE تحت مطالعه

جدول (۳): محتویات هارمونیک بارهای غیرخطی

شماره	مرتبه هارمونیک	جریان (P.U)
۱	۵	۰/۰۵۵۱
۲	۷	۰/۰۴۵۰
۳	۱۱	۰/۰۲۸۸
۴	۱۳	۰/۰۳۸۰
۵	۱۷	۰/۰۲۵۱
۶	۱۹	۰/۰۲۱۰
۷	۲۳	۰/۰۱۰۰
۸	۲۵	۰/۰۰۵۱

اعوجاج ولتاژ در تمام باس‌ها و برای تمام مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته شده، THDV، MLLF، و HTLL قبل از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs با اجرای برنامه پخش توان هارمونیک در شبکه آزمون تحت مطالعه محاسبه می‌شوند، این مقادیر برای هر شاخص مطابق با جدول (۴) به دست آمده است. شایان ذکر است که، تمامی مقادیر ارائه شده در جدول فوق تا ۳ رقم اعشار گرد شده است.



شکل (۶): محتویات هارمونیک بارهای غیرخطی

نتایج به دست آمده در جدول (۴) نشان‌دهنده آلودگی هارمونیک بیش‌ازحد در شبکه آزمون تحت مطالعه است. به عبارت دیگر، سطوح اعوجاجات هارمونیک به دست آمده از محدودیت‌های ارائه شده توسط استاندارد IEEE ۵۱۹ بیشتر است. در جدول فوق در باس‌هایی که اعوجاج هارمونیک کل و تکی ولتاژ از حد مجاز استاندارد بیشتر است بارنگ قرمز مشخص شده است. همچنین، به منظور نشان دادن توانایی و نیرومندی الگوریتم حل پیشنهادی، مسئله برنامه‌ریزی APFs در سه سناریو مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مشخصات سناریوهای در نظر گرفته شده در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): سناریوهای مسئله برنامه‌ریزی APFs

شماره	سناریو	باس‌های کاندید برای نصب APFs
۱	اول	{۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶}
۲	دوم	{۱، ۲، ۵، ۷، ۸، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶}
۳	سوم	تمام باس‌ها: {۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶}

علاوه بر این، به منظور افزایش انعطاف‌پذیری در روند حل مسئله از ۴ نوع APF مطابق با جدول (۶) استفاده شده است.

جدول (۶): انواع APFs (میزان جریان بر اساس ۱۰MVA و ۱۲kV)

شماره	نوع APFs	حداکثر جریان APFs (%)
۱	نوع $\alpha$	۷
۲	نوع $\beta$	۶
۳	نوع $\delta$	۵
۴	نوع $\sigma$	۴

مسئله برنامه‌ریزی APFs در ۲ مورد مطالعه‌ای با فرضیات زیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

- در مورد اول، الگوریتم محدودیت جریان APF (اندازه APF) را در نظر نمی‌گیرد.
- در مورد دوم، الگوریتم محدودیت جریان APF (اندازه APF) را در نظر می‌گیرد.

جدول (۴): ولتاژهای هارمونیک در تمام باس‌ها و شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی در شرایط اولیه (قبل از حل مسئله)

اعوجاج ولتاژ برای هر مرتبه هارمونیک (%)												
شماره	باس	THDV	MLLF	HTLL	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
۱	۱	۸/۴۵۶	۳/۱۰۶	۰/۵۰۴	۵/۵۹۷	۲/۲۰۸	۲/۴۱۶	۵/۱۰۲	۰/۵۰۴	۱/۸۰۸	۰/۳۸۰	۰/۲۳۴
۲	۲	۸/۶۷۶	۳/۲۲۶	۰/۵۹۳	۶/۰۵۶	۲/۰۵۸	۲/۲۸۴	۴/۶۰۲	۰/۷۴۵	۲/۶۹۸	۰/۵۰۸	۰/۳۳۴
۳	۳	۷/۷۴۶	۳/۱۳۶	۰/۱۳۵	۶/۴۶۵	۱/۷۱۲	۱/۶۳۶	۲/۵۵۰	۱/۰۱۳	۲/۲۴۵	۰/۲۰۳	۰/۰۷۲
۴	۴	۷/۲۷۶	۳/۰۸۶	۰/۲۸۴	۶/۶۱۶	۱/۵۱۴	۱/۱۶۹	۱/۳۳۲	۱/۰۶۷	۱/۵۹۰	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰
۵	۵	۷/۷۳۶	۳/۲۰۶	۰/۴۱۲	۶/۱۰۶	۱/۰۱۸	۰/۳۹۶	۲/۹۸۹	۱/۰۱۵	۱/۴۰۸	۰/۶۱۸	۰/۴۹۴
۶	۶	۷/۱۰۶	۳/۱۷۶	۰/۳۷۴	۶/۶۴۶	۰/۸۷۹	۰/۷۹۵	۳/۵۰۵	۰/۶۸۷	۱/۵۵۸	۰/۳۴۰	۰/۱۵۳
۷	۷	۸/۸۳۶	۳/۲۶۶	۰/۲۲۷	۶/۲۱۶	۰/۸۸۸	۱/۹۲۶	۵/۲۵۲	۱/۰۴۵	۲/۳۹۹	۰/۴۵۸	۰/۵۶۷
۸	۸	۸/۷۸۶	۳/۲۴۶	۰/۳۴۴	۶/۱۹۶	۰/۸۷۹	۱/۹۲۳	۵/۲۸۹	۱/۰۲۵	۲/۳۹۸	۰/۴۴۸	۰/۵۶۷
۹	۹	۸/۶۵۶	۳/۲۲۶	۰/۴۶۵	۶/۰۲۶	۲/۰۴۸	۲/۲۸۶	۴/۵۹۲	۰/۷۴۳	۲/۶۸۸	۰/۵۰۶	۰/۲۹۷
۱۰	۱۰	۱۳/۲۶۷	۴/۶۱۶	۰/۴۲۶	۷/۲۹۷	۳/۹۵۸	۴/۰۸۶	۹/۳۶۲	۱/۶۶۵	۰/۶۶۳	۰/۲۰۸	۰/۱۹۷
۱۱	۱۱	۱۴/۸۳۷	۵/۱۲۶	۰/۳۲۴	۸/۳۵۹	۵/۰۰۸	۴/۵۴۳	۹/۷۹۹	۱/۹۹۵	۱/۵۴۳	۰/۱۱۸	۰/۰۹۰
۱۲	۱۲	۱۴/۷۱۷	۵/۲۱۶	۰/۱۱۶	۸/۲۵۸	۴/۸۹۸	۴/۵۲۶	۹/۹۲۲	۱/۹۸۹	۱/۵۲۸	۰/۱۳۰	۰/۰۹۰
۱۳	۱۳	۱۱/۰۱۷	۴/۶۴۶	۰/۵۰۷	۹/۱۰۹	۵/۴۳۸	۲/۰۲۶	۱/۵۴۴	۰/۹۵۵	۰/۸۴۸	۰/۳۹۹	۰/۱۱۳
۱۴	۱۴	۱۲/۶۶۷	۵/۱۳۶	۰/۳۳۴	۹/۷۶۰	۵/۹۷۸	۱/۷۷۰	۴/۹۳۴	۱/۲۵۵	۰/۷۶۷	۰/۲۷۸	۰/۱۴۴
۱۵	۱۵	۱۱/۴۰۶	۴/۶۵۶	۰/۲۵۴	۹/۲۵۸	۵/۲۴۸	۰/۷۸۵	۳/۰۴۶	۳/۲۹۵	۱/۶۵۷	۰/۵۱۰	۰/۲۴۳
۱۶	۱۶	۱۱/۷۰۷	۴/۷۵۶	۰/۲۵۵	۹/۲۴۴	۵/۲۴۸	۰/۷۸۶	۳/۱۰۳	۳/۲۹۵	۱/۶۵۸	۰/۵۱۸	۰/۲۴۳
میانگین		۱۰/۲۲۵	۱/۹۲۷	۰/۳۴۷	۷/۳۶۹	۳/۰۶۱	۲/۰۸۴	۴/۸۰۷	۱/۳۹۳	۱/۷۱۶	۰/۳۵۳	۰/۲۴۵

جدول (۸): نتایج بهینه مرتبط با اندازه APFs طراحی شده در مسئله

برنامه‌ریزی APFs بر مبنای مورد مطالعه‌ای اول

شماره	نوع APFs	جریان تزریقی: {شماره باس APFs نصب شده}		
		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱	نوع $\alpha$	{۷}::۰/۰۷۰۰۰۰	{۷}::۰/۰۶۰۰۱۰	{۷}::۰/۰۷۰۰۰۰
		{۲۴}::۰/۰۶۸۳۴۷	{۲۶}::۰/۰۵۴۷۱۵	{۲۴}::۰/۰۶۶۰۷۷
۲	نوع $\beta$	{۲۴}::۰/۰۷۰۰۰۰	{۲۴}::۰/۰۷۰۰۰۰	{۲۵}::۰/۰۷۰۰۰۰
		{۲۵}::۰/۰۶۰۰۰۰	{۲۳}::۰/۰۳۷۴۰۰	{۸}::۰/۰۵۳۶۸۰
۳	نوع $\delta$	—	{۲۵}::۰/۰۶۴۸۰۰	{۲۵}::۰/۰۴۲۳۰۱
		{۸}::۰/۰۳۶۰۱۰	{۸}::۰/۰۳۶۰۱۰	{۸}::۰/۰۳۴۱۰۱
۴	نوع $\sigma$	{۲۶}::۰/۰۴۰۰۰۰	—	{۵}::۰/۰۳۰۰۵۷

شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها برای مورد مطالعه‌ای اول در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۹): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای مورد مطالعه‌ای اول

سناریو	شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (%)			
	HTLL	MLLF	THDV	$I_{df}$
قبل از حل	۰/۳۴۷	۳/۹۲۷	۱۰/۲۲۵	۰
بعد از حل	۰/۳۰۹۵۸۱	۰/۰۲۴۲	۰/۱۶۲۸	۰/۶۴۸۳
	۰/۳۲۸۱۰۴	۰/۰۱۲۲	۰/۱۰۳۰	۰/۳۱۸۹
	۰/۳۷۲۸۸۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۳۸۷	۰/۲۱۸۴

همچنین به منظور مقایسه بهتر، شاخص‌های ارائه شده در جدول (۹) به تفکیک سناریو و قبل و بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در شکل (۷) ترسیم شده‌اند.

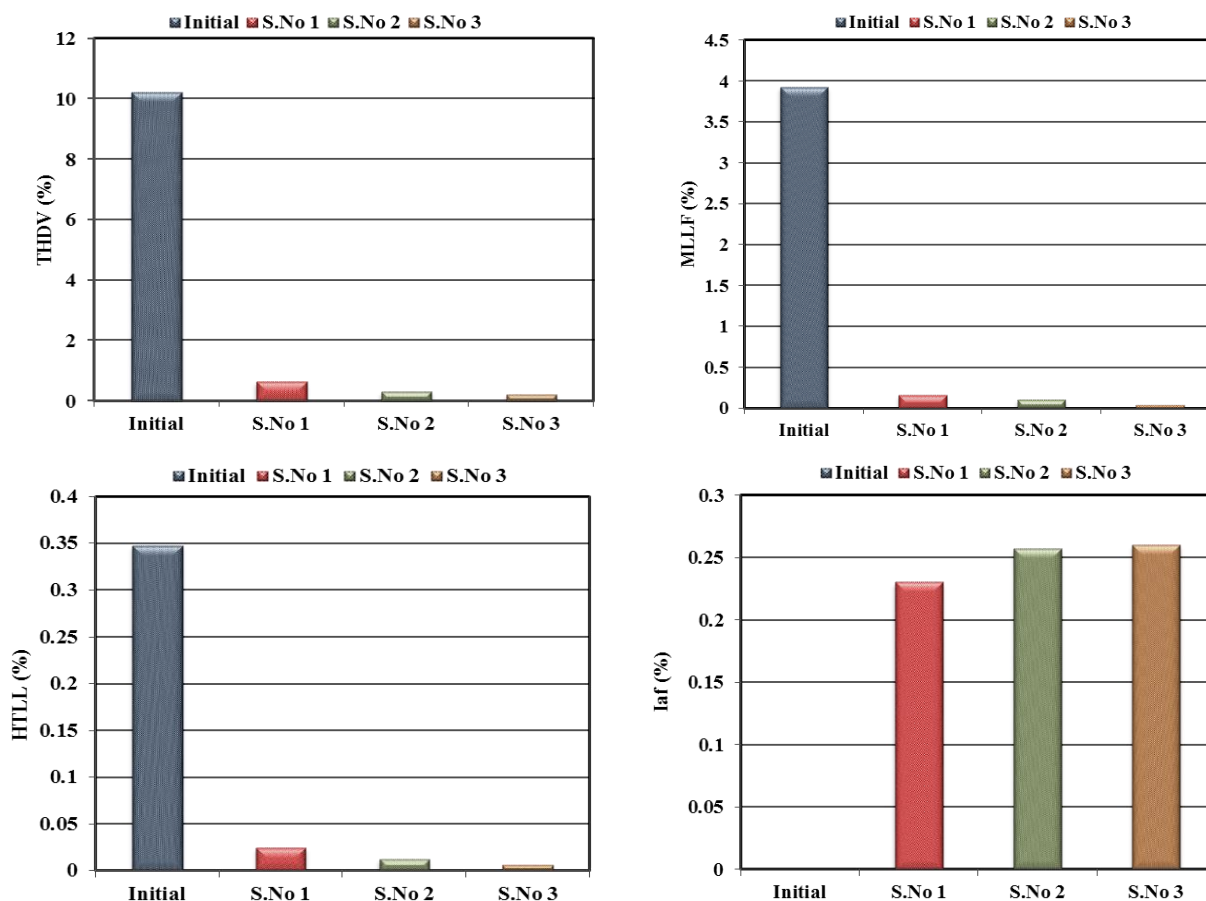
رویکرد پیشنهادی با استفاده از الگوریتم MSA پیاده‌سازی و اجرا شده است. پارامترهای تنظیمی الگوریتم MSA در جدول (۷) ارائه شده است. پارامترهای فوق، بهترین مقادیر به دست آمده پس از چندین اجرا می‌باشند.

جدول (۷): پارامترهای تنظیمی الگوریتم MSA

شماره	پارامتر الگوریتم MSA	مقدار
۱	$BW_{min}$	۰/۴
۲	$BW_{max}$	۰/۹
۳	$PAR_{min}$	۰/۰۱
۴	$PAR_{max}$	۰/۹۹
۵	PMN	۵
۶	PMS	۱۵۰
۷	PMCR	۰/۹۸
۸	NI	۵۰۰
۹	NII	۵۰۰

۵-۱- مورد مطالعه‌ای اول

در مورد مطالعه‌ای اول، محدودیت جریان APF در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر، اندازه یک APF به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. این فرض غیرعملی و غیراقتصادی است، زیرا اندازه APFs به دلیل ماهیت گسسته سلف‌ها و خازن‌ها دارای ماهیت گسسته می‌باشند. نتایج بهینه مرتبط با اندازه APFs طراحی شده در مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه بر مبنای مورد مطالعه‌ای اول در جدول (۸) ارائه شده است.



شکل (۷): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای مورد مطالعه‌ای اول

جریان‌های هارمونیک در بردارهای ملودی بداهه‌نوازی شده با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) اصلاح می‌شوند.

$$\left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_r = \left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_r \times \eta_{(b)}; \quad (25)$$

$$\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$$

$$\left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_i = \left[ (I_{af})_{(b)}^{(h)} \right]_i \times \eta_{(b)}; \quad (26)$$

$$\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$$

در معادلات (۲۵) و (۲۶)، ضریب اصلاح برای اصلاح بخش‌های حقیقی و موهومی جریان APF واقع شده در باس  $b$  است. این ضریب به‌عنوان یک مضرب صحیح از جریان APF واقع شده در باس  $b$  تعریف می‌شود. ضریب اصلاح در نظر گرفته شده با استفاده از رابطه (۲۷) بیان شده است [۵]. در نتیجه، به‌منظور در نظر گرفتن حداکثر جریان APF واقع شده در باس  $b$  بایستی تغییراتی در بردارهای ملودی بداهه‌نوازی شده مطابق با روابط (۲۸) و (۲۹) اعمال شود [۵]. در روابط (۲۸) و (۲۹) داریم:

$$\max(I_{af}) \quad \text{حداکثر جریان مجاز APF در باس } b \text{ مرتبه } h$$

نتایج ارائه‌شده در جدول (۹) و ترسیم شده در شکل (۷) بیانگر این واقعیت است که، شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL در هر سه سناریو از مورد مطالعه‌ای اول در محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد IEEE ۵۱۹ قرار گرفته‌اند. همچنین، با افزایش باس‌های کاندید به‌منظور جایابی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه، الگوریتم در روند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs دارای آزادی عمل بیشتری است. در نتیجه، برای شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs مقادیر مطلوب‌تری حاصل شده است.

## ۲-۵- مورد مطالعه‌ای دوم

در این بخش، الگوریتم محدودیت‌هایی برای جریان APFs (اندازه APFs) در نظر می‌گیرد. اندازه یک APF به‌عنوان یک متغیر گسسته در نظر گرفته می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی APFs با در نظر گرفتن محدودیت برای جریان APF یک مسئله عملی و کاربردی است. در این حالت، الگوریتم از اعداد صحیح از اندازه APFs استفاده می‌کند که اندازه آن‌ها به مقادیر ارائه‌شده در جدول (۶) محدود شده است. به‌منظور اعمال این فرضیات، بخش‌های حقیقی و موهومی از

$$\eta_{(b)} = \frac{\text{round}\left(100 \times \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}\right)}{100 \times \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}}; \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B \quad (27)$$

$$\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r = \begin{cases} \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r; \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2} \leq \max(I_{af}) \\ \frac{\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r \times \max(I_{af})}{\left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}}; \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2} > \max(I_{af}) \end{cases} \quad (28)$$

;  $\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$

$$\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i = \begin{cases} \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i; \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2} \leq \max(I_{af}) \\ \frac{\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i \times \max(I_{af})}{\left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}}; \left(\left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_r^2 + \left[(I_{af})_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2} > \max(I_{af}) \end{cases} \quad (29)$$

;  $\forall h = 2, 3, \dots, H, \forall b = 1, 2, \dots, B$

مسئله برنامه‌ریزی APFs در محدوده‌های مجاز تعیین شده توسط استاندارد ۵۱۹ IEEE قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر، شبکه آزمون تحت بررسی در حضور APFs از لحاظ آلودگی هارمونیک در وضعیت بسیار مطلوبی قرار دارد. همچنین، شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs در مورد مطالعه‌های دوم و تمام سناریوها قبل و بعد از حل مسئله به‌منظور مقایسه بهتر در جدول (۱۲) ارائه و در شکل (۸) ترسیم شده‌اند.

جدول (۱۲): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای مورد مطالعه‌های دوم

سناریو	شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (/)		
	HTLL	MLLF	THDV
قبل از حل	۰/۳۴۷	۳/۹۲۷	۱۰/۲۲۵
۱	۰/۲۲۰۲۵۸	۰/۱۰۰	۰/۲۷۰۶
۲	۰/۲۵۷۴۱۴	۰/۰۲۲۱	۰/۱۸۰۵
۳	۰/۲۶۰۱۳۷	۰/۰۱۱۶	۰/۱۸۴۷

از نتایج ارائه شده در جدول (۱۲) و ترسیم شده در شکل (۸) مشاهده می‌شود که، شاخص‌های HTLL، MLLF، THDV در هر سه سناریو از مورد مطالعه‌های دوم در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند، و مقادیر به‌دست آمده، محدودیت‌های مشخص شده توسط استاندارد ۵۱۹ IEEE را برآورده می‌کنند. همچنین، به منظور مقایسه شاخص‌های مسئله به تفکیک باس‌های شبکه، شاخص‌های فوق در تمام باس‌های شبکه آزمون تحت مطالعه، قبل و بعد از حل مسئله مبتنی بر سناریو سوم از مورد مطالعه‌های دوم در شکل (۹) ارائه شده است.

نتایج مرتبط با اندازه APFs طراحی شده در تمام سناریوهای در نظر گرفته شده بر مبنای مورد مطالعه‌های دوم در جدول (۱۰) ارائه شده است. شایان ذکر است که، مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs با در نظر گرفتن محدودیت‌های APFs یک مسئله کاربردی و اقتصادی است.

جدول (۱۰): نتایج مرتبط با اندازه APFs طراحی شده در مسئله برنامه‌ریزی APFs بر مبنای مورد مطالعه‌های دوم

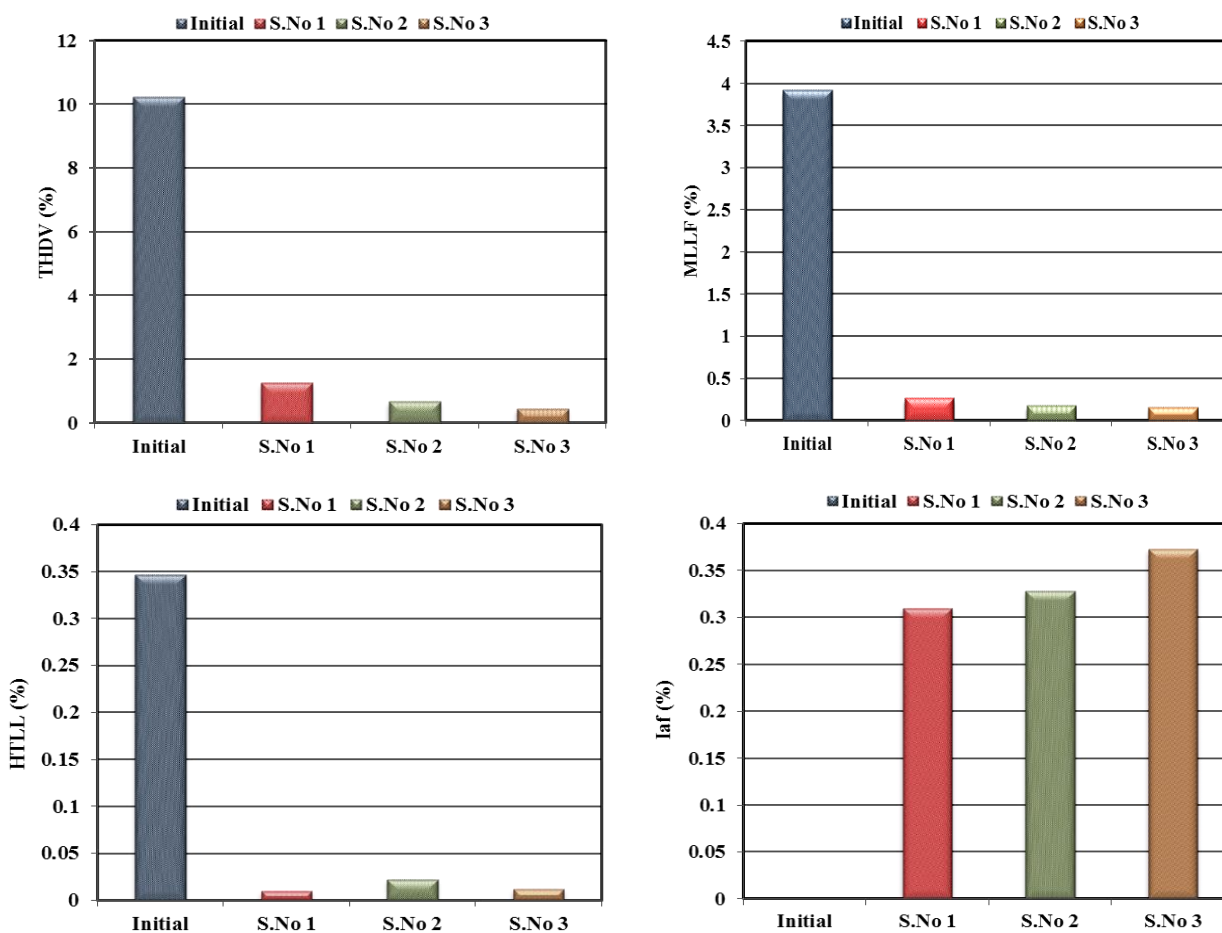
شماره	نوع APFs	جریان تزریقی: {شماره باس APFs نصب شده}		
		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱	نوع $\alpha$	{۷}:۰/۰۶۲۰۰۱	{۲۴}:۰/۰۵۰۲۷۱	{۷}:۰/۰۶۰۰۷۹
		{۲۵}:۰/۰۵۱۵۰۶	{۲۵}:۰/۰۵۱۵۰۶	{۲۴}:۰/۰۵۱۱۰۱
۲	نوع $\beta$	{۲۴}:۰/۰۵۰۱۵۶	{۷}:۰/۰۵۰۹۳۰	{۲۶}:۰/۰۵۷۲۱۶
		{۲۵}:۰/۰۴۵۰۶۸	{۲۵}:۰/۰۴۵۰۶۸	{۲۵}:۰/۰۴۶۰۰۷
۳	نوع $\delta$	{۲۳}:۰/۰۴۳۲۵۱	{۲۶}:۰/۰۳۴۱۰۰	{۲۵}:۰/۰۴۶۰۰۷
		{۲۳}:۰/۰۴۱۰۴۷	{۲۳}:۰/۰۴۱۰۴۷	{۵}:۰/۰۴۴۶۰۰
۴	نوع $\sigma$	{۲۶}:۰/۰۳۷۱۶۰	{۲۶}:۰/۰۳۳۵۰۰	—

اعوجاج ولتاژ در تمام باس‌ها و برای تمام مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته شده، شاخص‌های HTLL، MLLF، THDV بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs بر مبنای سناریوی سوم در مورد مطالعه‌های دوم مطابق با جدول (۱۱) به‌دست آمده است. شایان ذکر است که، تمامی مقادیر ارائه شده در جدول فوق تا ۳ رقم اعشار گرد شده‌اند. نتایج ارائه شده در جدول (۱۱) نشان‌دهنده این است که، پس از جایابی و اندازه‌یابی بهینه APFs در شبکه آزمون، اعوجاج‌های هارمونیک فردی و کل ولتاژ در تمام باس‌های شبکه و همچنین شاخص‌های

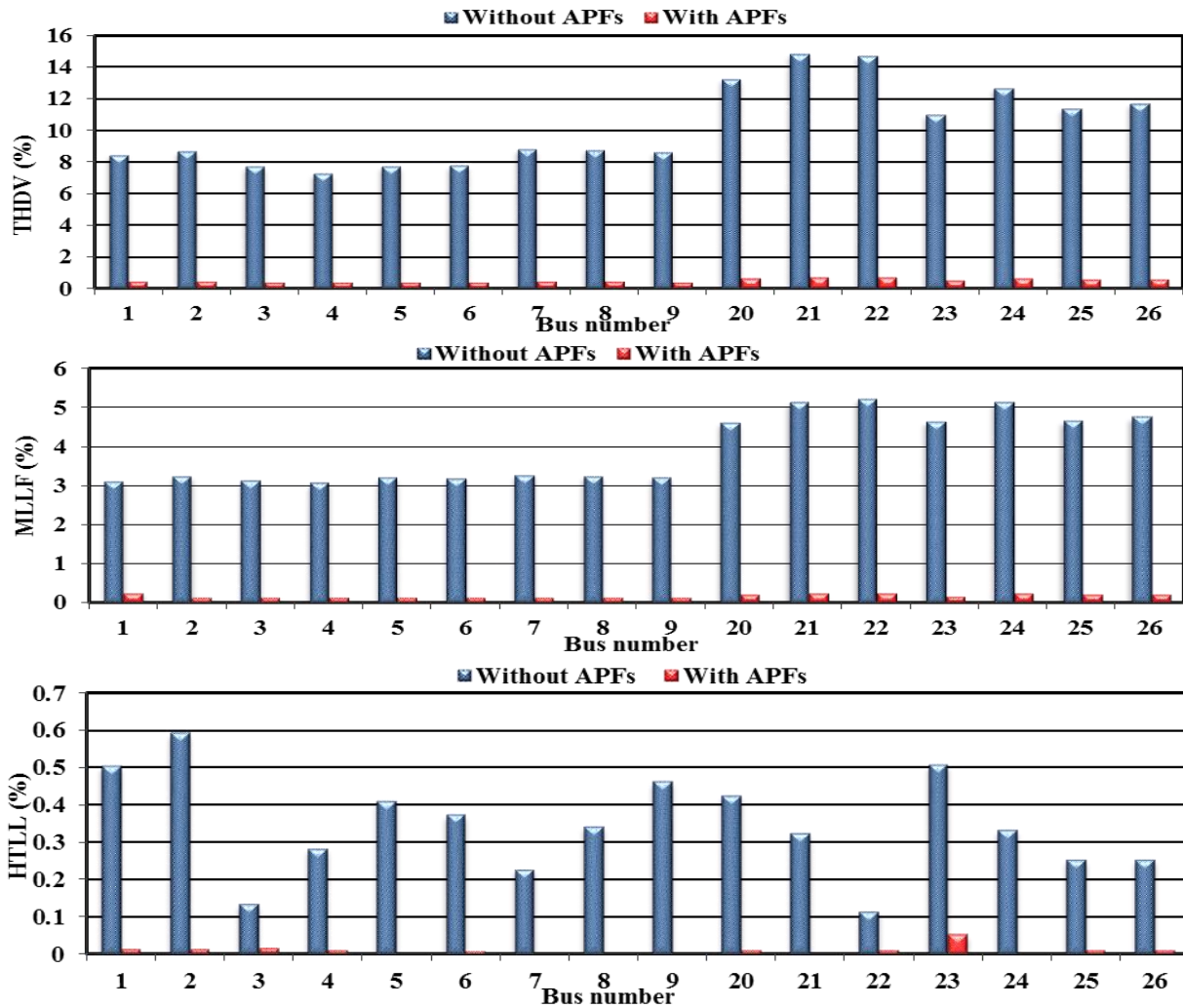
جدول (۱۱): ولتاژهای هارمونیک در تمام باس‌ها و شاخص‌های مسئله بر مبنای سناریو سوم از مورد مطالعه‌ای دوم (پس از حل مسئله)

اعوجاج ولتاژ برای هر مرتبه هارمونیک (%)

شماره	باس	THDV	MLLF	HTLL	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
۱	۱	۰/۳۹۶	۰/۲۳۴	۰/۰۱۶	۰/۲۶۵	۰/۱۰۳	۰/۲۱۸	۰/۵۷۳	۰/۲۵۰	۰/۹۰۵	۰/۱۷۸	۰/۱۱۱
۲	۲	۰/۴۱۰	۰/۱۵۲	۰/۰۱۵	۰/۲۸۷	۰/۹۸۰	۱/۱۴۲	۰/۳۱۲	۰/۳۹۰	۱/۳۳۶	۰/۲۵۱	۰/۱۶۷
۳	۳	۰/۳۶۳	۰/۱۴۶	۰/۰۱۷	۰/۳۰۶	۰/۸۰۵	۰/۸۱۸	۱/۲۸۱	۰/۵۱۳	۱/۱۰۲	۰/۱۰۰	۰/۰۳۴
۴	۴	۰/۳۴۳	۰/۱۴۴	۰/۰۱۱	۰/۳۱۱	۰/۷۲۰	۰/۵۸۴	۰/۶۶۹	۰/۵۴۰	۰/۷۸۷	۰/۲۴۷	۰/۰۴۲
۵	۵	۰/۳۶۵	۰/۱۵۰	۰/۰۰۷	۰/۳۲۳	۰/۴۸۵	۰/۲۰۷	۰/۵۰۱	۰/۵۰۴	۰/۶۹۷	۰/۳۰۵	۰/۲۳۴
۶	۶	۰/۳۶۹	۰/۱۴۹	۰/۰۱۰	۰/۳۱۵	۰/۴۱۸	۰/۳۹۷	۰/۷۶۱	۰/۳۵۱	۰/۷۸۱	۰/۱۶۸	۰/۰۷۲
۷	۷	۰/۴۱۸	۰/۱۵۳	۰/۰۰۶	۱/۲۹۴	۰/۴۲۳	۰/۹۷۳	۱/۶۳۸	۰/۵۱۹	۱/۱۸۸	۰/۲۲۶	۰/۲۶۹
۸	۸	۰/۴۱۲	۰/۱۵۲	۰/۰۰۱	۰/۲۹۳	۰/۴۱۸	۰/۹۶۱	۰/۶۵۷	۰/۵۲۴	۱/۱۹۸	۰/۲۲۱	۰/۲۶۹
۹	۹	۰/۳۹۰	۰/۱۵۱	۰/۰۰۳	۰/۲۸۶	۰/۹۵۵	۰/۱۴۳	۱/۰۳۷	۰/۳۶۹	۰/۳۳۱	۰/۲۶۰	۰/۱۴۱
۱۰	۲۰	۰/۶۲۸	۰/۲۱۲	۰/۰۱۱	۱/۸۷۵	۰/۳۴۵	۰/۲۴۳	۰/۷۱۴	۰/۸۲۸	۰/۳۲۸	۰/۱۰۲	۰/۰۹۳
۱۱	۲۱	۰/۶۷۶	۰/۲۴۲	۰/۰۰۴	۰/۳۹۶	۰/۲۳۸	۰/۲۷۱	۱/۹۲۴	۰/۹۹۲	۰/۷۶۴	۰/۰۶۷	۰/۰۵۲
۱۲	۲۲	۰/۶۹۲	۰/۲۴۶	۰/۰۱۱	۰/۳۹۲	۰/۲۳۲	۰/۲۲۵	۰/۹۸۶	۰/۹۹۹	۰/۷۶۲	۰/۰۶۴	۰/۰۴۲
۱۳	۲۳	۰/۴۹۷	۰/۱۵۹	۰/۰۰۴	۰/۴۳۱	۰/۳۵۸	۰/۱۱۳	۰/۷۷۴	۰/۴۸۵	۰/۴۳۰	۰/۱۹۷	۰/۰۵۳
۱۴	۲۴	۰/۶۰۰	۰/۲۴۳	۰/۰۱۱	۰/۴۶۲	۰/۲۸۳	۰/۸۸۵	۱/۴۷۸	۰/۶۲۴	۰/۳۹۰	۰/۱۴۷	۰/۰۶۸
۱۵	۲۵	۰/۵۴۰	۰/۲۱۴	۰/۰۵۳	۰/۴۳۹	۰/۲۴۸	۰/۴۰۲	۱/۵۴۰	۱/۶۳۸	۰/۸۲۰	۰/۲۵۲	۰/۱۱۵
۱۶	۲۶	۰/۵۵۴	۰/۲۰۹	۰/۰۰۷	۰/۴۳۸	۰/۲۴۸	۰/۴۰۳	۰/۵۵۸	۰/۶۳۸	۰/۸۲۱	۰/۲۵۶	۰/۱۱۵
	میانگین	۰/۴۷۹	۰/۱۸۵	۰/۰۱۲	۰/۴۱۱	۰/۵۴۳	۰/۴۹۹	۰/۹۶۳	۰/۶۳۵	۰/۷۹۰	۰/۱۷۶	۰/۱۱۷



شکل (۸): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای مورد مطالعه‌ای دوم



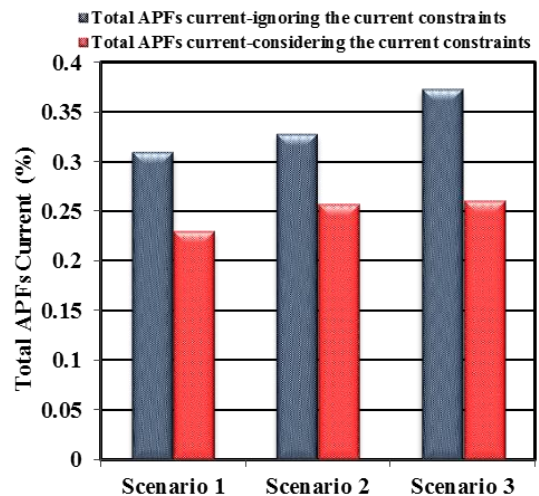
شکل (۹): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs در تمام باس‌ها، قبل و بعد از حل مسئله مبتنی بر سناریو سوم از مورد مطالعه‌ای دوم

### ۵-۳- ارزیابی ورود و خروج المان‌های شبکه توزیع انرژی الکتریکی

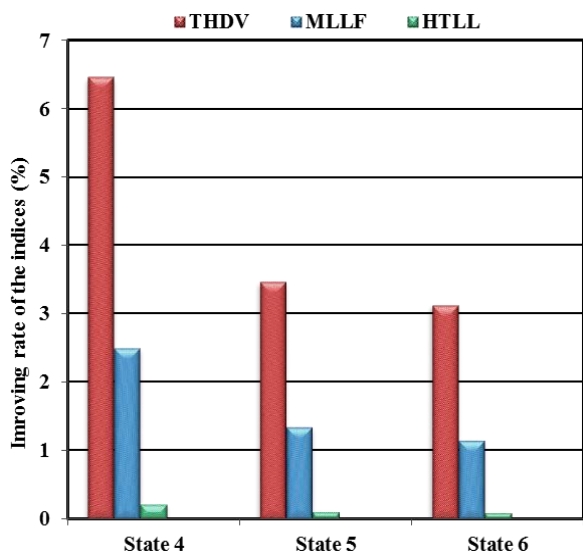
در این بخش، جهت ارزیابی ورود و خروج المان‌های شبکه توزیع انرژی الکتریکی، شش حالت مختلف مبتنی بر مورد مطالعه‌ای دوم و سناریو سوم تعریف و پیاده‌سازی شده است. این شش حالت عبارتند از:

- حالت اول: یک منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس ۲۱ با بار خطی نصب شده است.
- حالت دوم: یک منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس ۲۵ با بار غیرخطی نصب شده است.
- حالت سوم: دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس‌های ۲۱ و ۲۵ نصب شده است.

جریان APFs با و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های جریان در هر دو مورد مطالعه‌ای و تمام سناریوها در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): جریان APFs با و بدون در نظر گرفتن محدودیت جریان در تمام سناریوها



شکل (۱۲): نرخ بهبود شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs به ازای 0.1 p.u جریان تزریقی APFs در حالت‌های مرتبط با خروج فیدر و ورود بار غیر خطی

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱۳) و ترسیم شده در شکل (۱۱) مبتنی بر حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده، می‌توان نتایج ذیل را استنباط نمود:

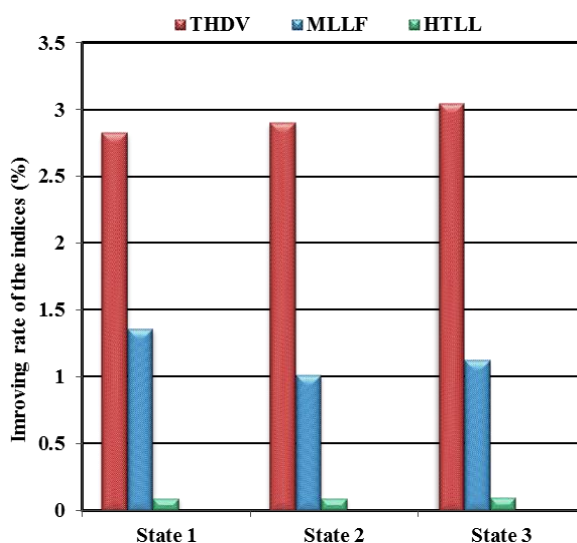
- ورود منابع تولید پراکنده، اعوجاج هارمونیکی شبکه توزیع انرژی الکتریکی را افزایش داده است. بر این اساس، جریان تزریقی فیلترهای اکتیو افزایش می‌یابد تا شاخص‌های مدل پیشنهادی در سطوح استاندارد قرار بگیرند.
- ورود منابع تولید پراکنده در باس با بار غیر خطی در مقایسه با ورود آن‌ها در باس‌ها با بار خطی، شرایط نامناسب‌تری را به لحاظ هارمونیکی ایجاد نموده است.
- علاوه، نتایج ذیل برای حالت‌های خروج فیدر و ورود بار غیر خطی بر اساس جدول (۱۳) و شکل (۱۲)، قابل بیان است:
- بطور کلی، خروج یک فیدر، به دلیل اینکه می‌تواند سبب خروج بار غیر خطی در انشعاب مرتبط با آن در شبکه توزیع انرژی الکتریکی شود، شرایط بهتری را به لحاظ هارمونیکی ایجاد نموده است.
- خروج فیدر ۲۳-۲۱ به دلیل خارج نمودن ۲ بار غیر خطی در مقایسه با خروج فیدر ۱-۲ که منجر به خارج شدن ۱ بار غیر خطی می‌شود، شرایط قابل قبول‌تری را از نظر هارمونیکی فراهم نموده است.
- در انتها، ورود یک بار غیر خطی در باس ۹، به دلیل تزریق جریان‌های هارمونیکی، منجر به تخطی محدودیت‌ها از استانداردهای مجاز شده است. بنابراین، به منظور قرارگیری شرایط در محدوده‌های قابل قبول، جریان تزریقی فیلترهای اکتیو افزایش یافته است.

- حالت چهارم: خروج فیدر ۲۳-۲۱ در انشعاب عمودی شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.
- حالت پنجم: خروج فیدر ۲۳-۲۱ در انشعاب افقی شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.
- حالت ششم: ورود یک بار غیر خطی جدید در باس ۹ شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.

شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs بدست آمده از پیاده‌سازی شش حالت فوق‌الذکر قبل و بعد از حل مسئله در جدول (۱۳) ارائه شده است. همچنین، نرخ بهبود شاخص‌های مسئله مذکور به ازای 0.1 p.u تزریق جریان توسط APFs برای حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده و حالت‌های خروج فیدر و ورود بار غیر خطی به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده‌اند.

جدول (۱۳): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs قبل و بعد از حل مسئله بدست آمده از پیاده‌سازی شش حالت تعریف شده

حالت	شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (%)			
	I <sub>af</sub>	HTLL	MLLF	THDV
۱	قبل از حل	۰/۳۶۱	۳/۹۹۵	۱۱/۰۲۳
	بعد از حل	۰/۳۸۱۶۵۰	۰/۰۰۶۴	۰/۰۳۹۹
۲	قبل از حل	۰/۳۸۷	۴/۰۰۱	۱۱/۴۷۶
	بعد از حل	۰/۳۸۶۹۲۹	۰/۰۰۶۷	۰/۰۴۰۵
۳	قبل از حل	۰/۴۱۰	۴/۵۵۲	۱۲/۴۲۹
	بعد از حل	۰/۳۹۹۳۶۷	۰/۰۰۶۹	۰/۰۴۱۱
۴	قبل از حل	۰/۳۴۷	۳/۹۲۷	۱۰/۲۲۵
	بعد از حل	۰/۱۵۶۷۲۳	۰/۰۰۱۰	۰/۰۹۲۹
۵	قبل از حل	۰/۳۴۷	۳/۹۲۷	۱۰/۲۲۵
	بعد از حل	۰/۲۸۸۵۲۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۹۹۶
۶	قبل از حل	۰/۴۹۲	۴/۶۸۳	۱۲/۸۴۷
	بعد از حل	۰/۴۰۱۱۳۷	۰/۰۰۷۱	۰/۰۴۵۲۹



شکل (۱۱): نرخ بهبود شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs به ازای 0.1 p.u جریان تزریقی APFs در حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده

## ۶- صحت‌سنجی نتایج

مسئله و در حضور APFs در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند و شبکه از لحاظ آلودگی هارمونیک در شرایط مطلوب قرار دارد. علاوه بر این، با افزایش باس‌های کاندید به‌منظور جایابی APFs الگوریتم از آزادی عمل بیشتری برخوردار است، و نتایج محاسبه‌شده برای شاخص‌ها دارای مقادیر کمتر و مطلوب‌تری می‌باشند. همچنین، مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد پیشنهادی در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم قدرتمند MSA در مقایسه با نتایج حاصل از GA و DPSO مؤثرتر و کارآمدتر می‌باشند. به‌بیان‌دیگر، رویکرد پیشنهادی با تزریق جریان کمتری از APFs در مقایسه با GA و DPSO به مقادیر مطلوب‌تری از شاخص‌ها دست‌یافته است. بنابراین، رویکرد چندهدفه پیشنهادی ممکن است یک روش مناسب برای بهبود شاخص‌های کیفیت توان در EPDNs محسوب گردد. راه‌های مختلفی برای دنبال کردن و بهبود رویکرد پیشنهادی وجود دارد از قبیل استفاده همزمان از APFs و PPFs به‌منظور طراحی یک رویکرد با انعطاف‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه‌ها و/یا در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع هارمونیک در فرآیند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs که تحت توسعه و پیاده‌سازی توسط نویسندگان قرار دارد.

## مراجع

- [1] Fuchs E.F., Masoum M.A.S, *Power quality in power systems and electrical machines*, Elsevier Academic Press: Burlington, USA, 2008, ISBN: 978-0-12-369536-9.
- [2] Arif M.R., Mahmood F., Hashmi M., Hanninen S. "Application of passive filters to mitigate power quality problems caused by induction furnaces", 2012 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali, Indonesia, 23–27 September 2012: 1227–1230.
- [3] Das J.C. "Passive filters—potentialities and limitations", IEEE Transactions on Industrial Applications, 2004, Vol. 40, pp. 232-241.
- [4] Kumar A., Singh J. "Harmonic mitigation and power quality improvement using shunt active power filter", International Journal of Electrical, Electronics and Mechanicals Controls (IJEEMC) 2013, Vol. 2, pp. 1–13.
- [5] Mulla M.A., Chudamani R., Chowdhury A. "Series hybrid active power filter for mitigating voltage unbalance and harmonics under unbalanced non-sinusoidal supply conditions", 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECON), Kota Kinabalu, Malaysia, 2–5 December 2012, pp. 671–676.
- [6] Angulo M., Ruiz-Caballero D.A., Lago J., Heldwein M.L. "Active power filter control strategy with implicit closed-loop current control and resonant controller", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, Vol. 60, pp. 2721-2730.
- [7] Ziari I., Jalilian A. "A new approach for allocation and sizing of multiple active power-line conditioners", IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, Vol. 25, pp. 1026-1035.
- [8] Keypour R., Seifi H., Yazdian-Varjani A. "Genetic based algorithm for active powerfilter allocation and sizing", Electric Power Systems Research, 2004, vol. 71, pp. 41–49.

به‌منظور صحت‌سنجی مطالعات عددی، مقایسه شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs پس از حل مسئله در سناریو سوم و بر مبنای مورد مطالعه‌ای دوم با [۷] و [۸] در جدول (۱۴) ارائه‌شده است. شایان‌ذکر است که، در [۷]، شاخص‌های THDV، MLLF، HTLL و  $I_{af}$  به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی تک هدفه و مبتنی بر ضرایب وزنی پیاده‌سازی و اجرا شده است. همچنین برای به دست آوردن جواب بهینه از الگوریتم DPSO استفاده شده است. در مدل پیشنهادی [۷] از سه نوع مختلف APFs استفاده شده است که حداکثر جریان آن‌ها به  $0.7 P.U$  محدود شده است. در [۸]، تنها شاخص‌های THDV و  $I_{af}$  به‌صورت مدل بهینه‌سازی تک هدفه پیاده‌سازی و اجرا شده است. در روند حل مسئله بهینه‌سازی نیز تنها یک نمونه فیلتر برای جبران سازی هارمونیک‌ها بکار گرفته شده است. همچنین، برای به دست آوردن جواب بهینه از الگوریتم GA استفاده شده است.

## جدول (۱۴): مقایسه نتایج مدل پیشنهادی در مورد مطالعه‌ای دوم و

شماره	شاخص مسئله	الگوریتم حل		
		GA [8]	DPSO [7]	MSA
۱	THDV (%)	۰/۲۲۰۰۰۰	۰/۵۹۰۰۰۰	۰/۴۵۶۳۰۰
۲	MLLF (%)	—	۰/۱۸۰۰۰۰	۰/۱۶۳۷۰۰
۳	HTLL (%)	—	۰/۰۱۳۴۰۰	۰/۰۱۲۰۰۰
۴	$I_{af}$ (%)	۰/۳۹۲۸۰۰	۰/۲۹۰۰۰۰	۰/۲۶۰۱۳۷

نتایج ارائه شده در جدول (۱۴) بیانگر این واقعیت است که، رویکرد پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با روش‌های ارائه شده در مراجع [۷] و [۸] با میزان جریان APFs کمتری (هزینه کمتر) به نتایج مطلوب‌تری دست یافته است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد چندهدفه جدید در زمینه برنامه‌ریزی APFs به‌منظور افزایش کیفیت توان تحویلی به مشترکین در EPDNs پیشنهاد گردید. در رویکرد چندهدفه ارائه‌شده، شاخص‌های THDV، MLLF، HTLL و  $I_{af}$  به‌عنوان چهار هدف مسئله برنامه‌ریزی APFs در نظر گرفته شده‌اند. اعوجاج‌های هارمونیک کل و فردی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز APFs نیز به‌عنوان محدودیت‌های مسئله مدل شده‌اند. مسئله برنامه‌ریزی APFs تحت سناریوهای مختلف و موارد مطالعه‌ای متفاوت بر روی شبکه آزمون تحت مطالعه اجرا و پیاده‌سازی گردید. تفاوت سناریوها در تعداد باس‌های کاندید در نظر گرفته‌شده به‌منظور جایابی APFs است. همچنین، تفاوت موارد مطالعه‌ای در نادیده گرفتن یا در نظر گرفتن محدودیت‌های مرتبط با جریان APFs است. رویکرد چندهدفه پیشنهادی با موفقیت بر روی شبکه آزمون تحت مطالعه پیاده‌سازی شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL پس از حل

- <sup>24</sup> Number of solution vector generations in third phase (NI)  
<sup>25</sup> Band width (BW)  
<sup>26</sup> Player memory considering rate (PMCR)  
<sup>27</sup> Pitch adjustment rate (PAR)  
<sup>28</sup> Alternative improvisation procedure (AIP)

[9] Ziari I., Jalilian A. "Optimal placement and sizing of multiple APLCs using a modified discrete PSO", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, Vol. 43, pp. 630–639.  
 [10] Ziari I., Jalilian A. "Optimal allocation and sizing of active power line conditioners using a new particle swarm optimization-based approach", Electric Power Components and Systems, 2012, Vol. 40, pp. 273–291.  
 [11] Moradifar A., Soleymanpour H.R. "A fuzzy based solution for allocation and sizing of multiple active power filters", Journal of Power Electronics, 2012, Vol. 12, pp. 830–841.  
 [12] Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayanderodi H. "Optimum placement of active power conditioner in distribution systems using improved discrete firefly algorithm for power quality enhancement", Applied soft computing, 2014, Vol. 23, pp. 249–258.  
 [13] He N., Xu D., Huang L. "The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, pp. 2841–2851.  
 [14] Ashrafi S.M, Dariane A.B. "Performance evaluation of an improved harmony search algorithm for numerical optimization: melody search (MS)" Engineering Application of Artificial Intelligence. 26 (2013) 1301-1321.  
 [15] Geem Z.W, Kim J.H, Loganathan G.V. "Harmony search optimization: applica-tion to pipe network design, Int. J. Model " Simul. 22 (2002) 125–133.  
 [16] Shivaie M, Sepasian M.S, Sheikh-El-Eslami M.K. "Multi-objective transmission expansion planning using fuzzy-genetic algorithm". Iranian Journal of Science and Technology, Trans. Electr. Eng. 35 (2011) 141–159.

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Electrical power distribution networks (EPDNs)  
<sup>2</sup> Point of common coupling (PCC)  
<sup>3</sup> Passive power filters (PPFs)  
<sup>4</sup> Active power filters (APFs)  
<sup>5</sup> Total harmonic distortion of voltage (THDV)  
<sup>6</sup> Total harmonic distortion of current (THDI)  
<sup>7</sup> Harmonic transmission line loss (HTLL)  
<sup>8</sup> Total current of the active power filters ( $I_{af}$ )  
<sup>9</sup> Motor load loss function (MLLF)  
<sup>10</sup> Genetic algorithm (GA)  
<sup>11</sup> Discrete particle swarm optimization (DPSO)  
<sup>12</sup> Modified discrete particle swarm optimization (MDPSO)  
<sup>13</sup> Improved discrete firefly algorithm (IDFA)  
<sup>14</sup> Multi-criteria decision-making (MCDM)  
<sup>15</sup> Pareto Optimal Set Solutions  
<sup>16</sup> Melody search algorithm (MSA)  
<sup>17</sup> Fuzzy satisfying method (FSM)  
<sup>18</sup> Harmony search algorithm (HSA)  
<sup>19</sup> Player memory (PM)  
<sup>20</sup> Melody memory (MM)  
<sup>21</sup> Player memory number (PMN)  
<sup>22</sup> Player memory size (PMS)  
<sup>23</sup> Number of solution vector generations in second phase (NII)